

学校编码: 10384  
学号: 22320131151447

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

声刺激对两种海洋甲壳动物运动行为和  
HSP70 表达的影响研究

Exploration for effects of acoustic stimulus on movement  
behavior and HSP70 expression of two kinds of marine  
crustaceans

周韦峥嵘

指导教师姓名: 许肖梅 教授

专 业 名 称: 海洋物理

论文提交日期: 2016 年 5 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2016 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘 要

水下噪声会潜在的引起海洋生物紧张,分散和掩蔽这些海洋生物重要的声信号,进而对海洋生物的行为和生存造成影响。近几十年来,随着人类社会的不断发展,人们将发展目光投向了占有全球 71% 面积的海洋。伴随海洋事业的快速发展,海洋工程噪声对海洋生物的影响引起了人们的极大关注。虽然目前已有不少研究成果评估了水下工程噪声对海洋生物的影响,这些噪声包括轮船、打桩、地震勘探以及风电场等水下噪声,表明海洋工程等人为噪声对鱼类以及海洋哺乳动物都将造成了不同程度的影响和伤害。但是,有关评估声刺激对海洋食物链中不可或缺海洋甲壳动物影响的研究还少有报道。

海洋甲壳动物种类繁多,且多是重要的食用种,具有极大的经济价值。其中南美白对虾和拟穴青蟹无论在经济价值、药用价值还是新天然产物的价值上(例如南美白对虾体内提取的虾青素等)都有不可撼动的地位,需求量与日俱增。同时,在国内外的研究中发现,海洋甲壳动物也会通过身体的振动、摩擦以及移动发出声音,并且可以感知和运用声信号。由于水生甲壳动物声信号感知频带范围基本在 3kHz 及以下,敏感频段在 1kHz 以下。因此,能量主要集中在 1kHz 以下的海洋工程噪声源将是海洋甲壳动物生存的最大威胁之一。舰船、石油钻井、施工打桩以及海上风电场等施工和营运期所产生的水下噪声是典型的海洋工程低频噪声源,可能会造成南美白对虾(*Litopenaeus Vannamei*)和拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)的行为变化和紧张反应,影响其正常的生命活动。

为了保护南美白对虾和拟穴青蟹,降低海洋工程噪声对南美白对虾和拟穴青蟹的影响,论文通过模拟打桩噪声及发射海洋甲壳动物敏感频段的声信号,探究海洋工程噪声和不同强度的声刺激对南美白对虾和拟穴青蟹的影响,从而为南美白对虾和拟穴青蟹的声学保护提供参考依据。

本论文的主要内容为:

1、介绍和分析了水生甲壳动物的声学特性、典型的海洋工程噪声的声学特性及其对海洋甲壳动物影响的国内外研究进展;

2、基于实际海域监测到的水下打桩噪声,分析了水下打桩噪声的声源级和

时频域特性、声传播衰减等参数；

3、在实验室环境下，设计了不同强度、不同类型水下噪声源及其对海洋甲壳动物影响的模拟实验方法。鉴于运动行为和 HSP70 在南美白对虾和拟穴青蟹日常行为活动及生理活动中扮演的重要角色，分析了南美白对虾和拟穴青蟹的运动行为以及拟穴青蟹 HSP70 的表达，并以运动参数和 HSP70 表达的变化作为南美白对虾和拟穴青蟹是否受噪声影响的判断依据；

4、通过对实验组和对照组南美白对虾运动轨迹的记录和运动参数的统计分析，探究了水下打桩噪声对南美白对虾的运动行为影响；

5、通过对实验组和对照组拟穴青蟹运动参数的统计分析及 HSP70 表达的测量，探究了在不同噪声源(频带在 100-1000Hz 的扫频噪声以及模拟水下打桩噪声)强度的声刺激下，拟穴青蟹的运动行为及 HSP70 表达的变化，分析噪声对其影响。

关键词：南美白对虾；拟穴青蟹；声刺激；运动行为；HSP70 表达

## Abstract

Underwater noise has the potential to bring stress to marine animals, distract and mask important sounds, and thus affect marine animal behavior and physiological parameters. Along with the development of human society, the human has given a new focus on exploring ocean resources. In recent decades, with the rapid development of the marine industry, the effect of man-made noises on marine life has attracted great attention. Many studies have evaluated the effects of anthropogenic acoustic disturbance on marine organisms, including sounds associated with shipping, pile driving, sonar, offshore wind farms and many other anthropogenic sources. The results showed that, these man-made noises have caused different degrees of influence on fish and marine mammals. However, few studies have evaluated the effects of acoustic stimuli on aquatic crustaceans, which are indispensable to the food chain of marine life.

There is a great variety of marine crustaceans, many of them are important edible species, and have great economic value. Among them, *Litopenaeus Vannamei* and *Scylla paramamosain* have unshakable status, because of their economic value, medicinal value and the value of new natural products. Meanwhile, research has found that many kinds of marine crustaceans could make sounds by moving, vibrating or rubbing their body, and also can receive and use acoustic signal. Considering aquatic crustaceans had been studied hearing are sensitive to acoustic stimulus below 1000Hz in frequency, the noises energy mainly concentrate below 1000Hz maybe constitute the biggest threat to aquatic crustaceans. The marine industry such as shipping, oil drilling, pile driving and offshore wind farm are typical low frequency sound source which would cause the change of movement behavior and stress reaction of *Litopenaeus Vannamei* and *Scylla paramamosain*, and potential affect their normal life activities.

In order to protect *Litopenaeus Vannamei* and *Scylla paramamosain*, mitigating the impact from underwater noise of marine engineering. This experiment by simulating pile driving noise and sending acoustic signal to exploration the engineering noise and different intensity of acoustic stimulus on *Litopenaeus*

*Vannamei* and *Scylla paramamosain*, and thus provide a reference basis of acoustic protection to *Litopenaeus Vannamei* and *Scylla paramamosain*.

The main contributions of this paper are as follows:

1. Introduced the acoustic characteristics of aquatic crustaceans, the acoustic characteristics of typical marine engineering and the impact on marine crustaceans in detail.

2. Analyzed the sound source pressure level, time and frequency domain feature and sound transmission loss of practical underwater pile driving noise.

3. In the laboratory environment, different intensity and different types of underwater noise sources, as well as the experiment method were design. Analyzed the motion behavior and HSP70 expression of aquatic crustaceans, and use these parameters as the criterion to measure whether aquatic crustaceans affected by noise.

4. By recording the movement locus and analyzing the motion parameters of the experimental group and control group, shows the impact of pile driving noise on movement behavior of *L. vannamei*.

5. Recorded the movement locus, analyzed the motion parameters and HSP70 expressions of the mud crab in experimental groups and control groups, shows the impact of different intensity of acoustic stimulus on movement behavior and HSP70 stress response of mud crab.

Keywords: *Litopenaeus Vannamei*; *Scylla paramamosain*; acoustic stimulus; movement behavior; HSP70 expression

# 目 录

摘要.....	I
Abstract .....	III
第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 海洋工程噪声概况 .....	2
1.1.2 南美白对虾及其价值 .....	5
1.1.3 拟穴青蟹及其价值 .....	6
1.2 国内外研究进展.....	8
1.2.1 海洋甲壳动物声特性研究进展 .....	8
1.2.2 噪声对海洋甲壳动物运动行为影响研究进展 .....	11
1.2.3 噪声对海洋甲壳动物 HSP70 影响研究进展 .....	15
第二章 水下噪声及其采集与分析 .....	18
2.1 浅海环境噪声.....	18
2.2 水下噪声数据采集系统.....	20
2.2.1 基于 NI 数据采集卡的采集系统 .....	21
2.2.2 DSG 数据采集系统 .....	24
2.2.3 B&K PULSE 多分析平台 .....	25
2.3 水下噪声数据分析软件及方法 .....	26
2.3.1 数据分析软件.....	26
2.3.2 数据分析方法.....	27
第三章 声刺激对南美白对虾运动行为的影响 .....	29
3.1 实验材料及方法 .....	29
3.1.1 研究物种 .....	29
3.1.2 实验设计 .....	29
3.2 实验噪声的时-频分析.....	30
3.2.1 海洋打桩施工水下噪声时-频分析及声源级估计 .....	30
3.2.2 实验室竹杆敲击水下噪声时-频分析 .....	32
3.2.3 实验室竹杆敲击和海洋打桩施工水下噪声时-频特性对比 .....	33
3.2.4 运动轨迹采集.....	35



3.2.5 运动参数统计分析 .....	36
<b>3.3 实验结果 .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4 总结与讨论 .....</b>	<b>41</b>
<b>第四章 声刺激对拟穴青蟹运动行为及 HSP70 表达的影响 .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 实验材料及方法 .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 研究物种 .....	43
4.1.2 实验设计 .....	43
4.1.3 实验使用声信号 .....	45
4.1.4 实时荧光定量多聚核苷酸链式反应技术 .....	46
4.1.5 核酸提取、cDNA 制备以及荧光定量 PCR 分析 .....	47
4.1.6 运动轨迹采集 .....	48
4.1.7 参数统计分析 .....	48
<b>4.2 实验结果 .....</b>	<b>49</b>
4.2.1 水下噪声信号分析 .....	49
4.2.2 运动轨迹及参数统计结果 .....	51
4.2.3 四种声刺激对拟穴青蟹 HSP70 表达的影响 .....	54
4.2.4 声刺激对拟穴青蟹 HSP70 不同时刻表达的影响 .....	56
4.2.5 海洋工程噪声对拟穴青蟹影响分析 .....	56
<b>4.3 总结与讨论 .....</b>	<b>58</b>
<b>第五章 总结与展望 .....</b>	<b>60</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>62</b>
<b>攻读硕士学位期间获得的成果 .....</b>	<b>70</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>71</b>

# Contents

<b>Abstract(in Chinese)</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	III
<b>Chapter 1 Preface</b> .....	1
<b>1.1 Background and Significance</b> .....	1
1.1.1 Overview of underwater anthropogenic noise .....	2
1.1.2 Pacific white shrimp ( <i>Litopenaeus Vannamei</i> ) and their values .....	5
1.1.3 Mud crab ( <i>Scylla paramamosain</i> ) and their values .....	6
<b>1.2 Developing status</b> .....	8
1.2.1 Developing status of marine crustaceans acoustic features .....	8
1.2.2 Developing status of effects of underwater noise on movement behavior of marine crustaceans .....	11
1.2.3 Developing status of effects of noise on HSP70 expression of marine crustaceans .....	15
<b>Chapter 2 Underwater noise and its acquisition and analysis</b> .....	18
<b>2.1 Shallow water environmental noise</b> .....	18
<b>2.2 Underwater data acquisition system</b> .....	20
2.2.1 Data acquisition system based on NI data acquisition card .....	21
2.2.2 DSG data acquisition system .....	24
2.2.3 B&K PULSE data acquisition system .....	25
<b>2.3 Software and method of underwater data process</b> .....	26
2.3.1 Software of data process .....	26
2.3.2 Method of data process .....	27
<b>Chapter 3 The effects of acoustic stimulus on movement behavior of Pacific white shrimp (<i>Litopenaeus Vannamei</i>)</b> .....	29
<b>3.1 Experimental materials and methods</b> .....	29
3.1.1 The species .....	29
3.1.2 Experimental design .....	29
<b>3.2 Time—frequency analysis of experimental noise</b> .....	30

3.2.1 Time-frequency analysis and source level estimate of offshore underwater pile driving construction noise .....	30
3.2.2 Time-frequency characteristics analysis of laboratory underwater drub noise .....	32
3.2.3 Time-frequency characteristics comparison between drub noise and pile driving noise .....	33
3.2.4 Movement locus acquisition .....	35
3.2.5 Statistical analysis of motion parameters .....	36
<b>3.3 Results</b> .....	37
<b>3.4 Conclusion and discussion</b> .....	41
<b>Chapter 4 The effects of acoustic stimulus on movement behavior and HSP70 expression of mud crab (<i>Scylla paramamosain</i>)</b> .....	43
<b>4.1 Experimental materials and methods</b> .....	43
4.1.1 The species .....	43
4.1.2 Experimental design .....	43
4.1.3 Experimental acoustic signal .....	45
4.1.4 Quantitative real-time PCR (qPCR) .....	46
4.1.5 Total RNA extraction, cDNA synthesis and qPCR analysis .....	47
4.1.6 Movement locus acquisition .....	48
4.1.7 Statistical analysis of experimental parameters .....	48
<b>4.2 Results</b> .....	49
4.2.1 Underwater noise analysis .....	49
4.2.2 Statistical results of experimental parameters .....	51
4.2.3 The effects of four kinds of acoustic stimulus on HSP70 expression of mud crab ( <i>Scylla paramamosain</i> ) .....	54
4.2.4 The effects of acoustic stimulus on HSP70 expression in different moments of mud crab ( <i>Scylla paramamosain</i> ) .....	56
4.2.5 The effects of underwater anthropogenic noise on mud crab ( <i>Scylla paramamosain</i> ) .....	56
<b>4.3 Conclusion and discussion</b> .....	58
<b>Chapter 5 Review and future prospect</b> .....	60
<b>References</b> .....	62
<b>Research projects and achievements</b> .....	70
<b>Acknowledgements</b> .....	71

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

海洋甲壳动物中的多种虾类及蟹类因其肉嫩味鲜、营养价值高而成为人们食用的佳品。我国是世界水产品出口大国，目前全球对虾年需求量约120万吨，贸易额达70多亿美元，随着国际市场对虾需求量的不断增长，南美白对虾的经济效益尤为突出。而雌性拟穴青蟹(俗称膏蟹)，有海上人参之美誉，是传统的名贵海产品，青蟹市场在世界各地蓬勃发展，尤其是雌蟹，其发展空间巨大，经济效益不可估量。鉴于南美白对虾和拟穴青蟹巨大的经济效益和营养价值，保护其生长环境变得极其重要。

海洋甲壳动物容易受到多种环境因子的胁迫。环境胁迫(envirionlnentalstress)是指环境对生物所处的生存状态产生的压力<sup>[1]</sup>。环境胁迫因子可分为物理因子、化学因子、生物因子和过程因子等几个类型，物理因子主要包括温度、盐度、光照和声音等；化学因子主要包括氨氮、亚硝酸盐、重金属等；生物因子主要包括致病微生物、寄生虫等；过程因子主要包括捕捉、养殖密度和个体竞争等<sup>[2]</sup>。事实上，海洋甲壳动物也会通过身体的振动、摩擦或者移动发出声音，使用不同的声音实现种间交流<sup>[3-4]</sup>，并且随着种类的不同，海洋甲壳动物至少可以感知到20-3000Hz频段之间的声音<sup>[5-10]</sup>。因此，环境噪声是影响海洋甲壳动物生命活动的一个重要环境胁迫因子。

近几十年来，随着人类社会经济的快速发展，人类活动如城市发展、交通运输网的扩大以及资源获取，都对全球的陆地和水生环境加注了大量噪声<sup>[11-13]</sup>，尤其随着陆上能源的逐渐短缺，涉海工程数量不断增加，如跨海大桥、海底隧道、船舶运输、港口码头、海上油气平台、海上风电场的建设等，这些涉海工程中要进行水下爆破、水下打桩、水下钻孔、船舶作业等工程施工，而这些施工过程会造成严重的噪声污染，并且导致了海洋环境噪声的主要变化<sup>[14]</sup>。因此，海洋工程噪声已经被认为是21世纪海洋中的主要污染源之一，出现在国家和国际的立法中(例如：美国国家环境政策法和欧洲委员会海洋战略框架指令)。

迄今为止,无论是陆地上还是水中,噪声对生物的影响主要关注的还是脊椎动物<sup>[13,15-17]</sup>而较少关注无脊椎动物,这与它们的数量和种类是极不相称的(例如,它们组成了 60%的海洋物种)。无脊椎动物无论在生态意义(食物链的重要组成),还是经济意义(特别是在改变渔业上),或者在新天然产物(例如南美白对虾体内提取的虾青素等)的价值上都扮演着十分重要的角色<sup>[18-19]</sup>。

鉴于海洋甲壳动物可能会因为海洋工程噪声的影响而受到伤害<sup>[20]</sup>,以及南美白对虾和拟穴青蟹在渔业和养殖中重要的经济地位。本文将通过模拟打桩噪声以及发射 100-1000Hz 扫频信号(海洋工程噪声能量集中频段),对南美白对虾和拟穴青蟹进行噪声影响下的行为观察和生理评估。行为学和生理学结合的方法对海洋甲壳动物意义重大,因为海洋甲壳动物在紧张状态下的行为模式还不是很清楚<sup>[21]</sup>,通过两个指标相结合,可以对外部或者内部压力刺激引起的生物体稳态扰动进行一个更加全面的探索和理解。目前涉及这类研究的相关成果极少,本研究具有一定的创新性和实际应用需求,研究结果希望能对南美白对虾和拟穴青蟹的声学保护提供科学的参考依据,并且在海洋甲壳动物的声学探索上贡献一份力量。

### 1.1.1 海洋工程噪声概况

地球表面约 70%的面积被海洋覆盖,人类在生产生活中越来越重视开发和利用海洋资源。由于海洋工程建设过程中需要进行水下爆破、打桩、钻孔、清淤等作业,增加了海上船舶的交通运输,这些水下工程活动将产生多种多样的水下强噪声,对海洋生态环境造成一定的影响,也对生活在海洋中的海洋生物造成影响。典型的海洋工程噪声包括:

#### (1) 水下爆破

水下爆破是指在水中或水底中进行的爆破作业。水下爆破常用的方法有裸露爆破法、钻孔爆破法以及洞室爆破法等。虽然水下爆破受水深、水压、流速、风浪等因素影响,但水下爆破产生的地震波比陆地爆破要大,水中冲击波危害较突出。由于水下爆破产生的冲击波强度大、作用范围广,因此对海洋生物有致伤甚至致死的影响<sup>[22]</sup>。据研究表明,起爆药量 55kg,距离声源 100m 处的水底裸露爆破声压级约在 207dB 左右,爆破能量集中于 0-4000Hz,1kHz 以下的声压级大于 180dB;起爆药量 12kg,距离声源 50m 处的水底裸露爆破声压级约 195dB 左右,爆破能量集中于 0-4000Hz,1kHz 以下的声压级大于 170dB<sup>[23]</sup>。

## (2) 水下打桩

海洋工程中的打桩施工，是桥梁、码头以及海上风电厂、液化天然气港口等建设中最主要的施工手段之一，常在海洋甲壳动物聚集的浅海水域进行。打桩噪声是当今主要令人担忧的海洋工程噪声，也是文献记载的除爆破以外唯一导致海洋生物在野外死亡的人为噪声<sup>[24]</sup>。这种噪声是由两物体相互撞击的能量快速释放产生的。撞击噪声的性质主要取决于撞击物的物理性质。当打桩锤击打桩时，声音从撞击处辐射到空气中并且以一个瞬态的应力波或者脉冲沿着桩径向下传播。撞击也会在桩壁产生弯曲(或者横向)的应力波伴随周围的流体(空气或者水)将声音辐射进水中并将额外的声音辐射进空气中。其特点为高声源级，单次冲击表现为脉冲式宽频波形，而对于一根桩柱需要多次冲击才能完成作业，因此表现为连续多个脉冲的脉冲串。在英国能源与气候变化部给出的《油气开采中的噪声估计与潜在危害总结报告》中，可以看到打桩噪声的峰值声源级可高达 251dB。

水下冲击打桩的噪声传播路径如图 1.1 所示。图中第 1 径为海面反射路径，撞锤冲击桩体产生的噪声经过海面反射后传至噪声接收端。第 2 径为水下直达路径，桩体产生的噪声通过该路径直接传至接收端。图中第 3 径为海底反射路径，噪声经过海底反射后传至接收端。第 4 径为海底传播路径，撞锤冲击桩体对海底施加冲击力产生压缩波和切变波在海底传播，其中部分噪声能量将传入水中。

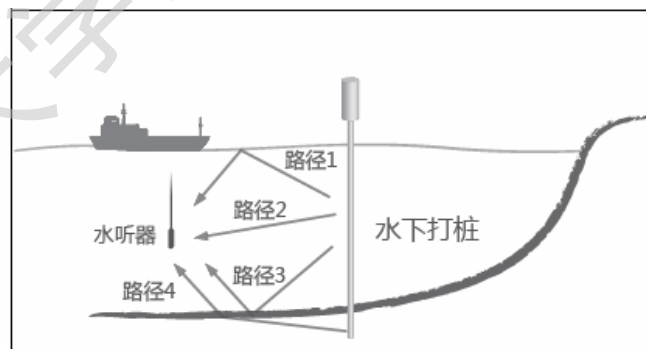


图 1.1 水下冲击打桩的噪声传播路径

Fig.1.1 The propagation path of underwater impact pile driving noise

## (3) 船舶噪声

船舶噪声是最常见的<sup>[25]</sup>，而且在过去的的一个世纪里，单单船舶噪声就使得水下环境噪声的低频部分(20-200Hz)增加了 10-100 倍<sup>[15]</sup>。海上船舶种类繁多，大小不一，其噪声特性也互有不同。但就总体而言，海上船舶的噪声声源级随着

船体积和装载量增大(排水量增大), 船速加快或桨叶增多(发动负载提高)而随之增强。图 1.2 为现代几种不同类型典型船舶的声源级谱图<sup>[26]</sup>。

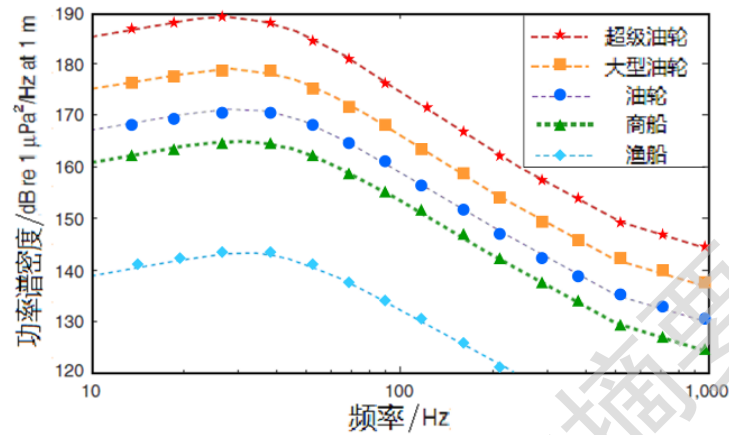


图 1.2 典型船舶噪声声源功率谱密度

Fig.1.2 Power spectral density of typical ship noise

目前针对民用船舶噪声对海洋生物影响的监测数据较少,对有限的相关资料和数据进行对比分析,可知船舶噪声的主要能量集中于 5kHz 以下的频段,谱级峰值基本在 1000Hz 以下,而船舶噪声的声源级一般在 150-200dB 之间。

#### (4) 水下钻井噪声

水下钻井也是海洋工程中重要的水下噪声源之一。近岸水下钻井工程通常在钻井平台、钻井船只和人工岛屿上进行。钻井工程可产生中频段的连续噪声<sup>[27]</sup>。1981至1984年, Greene等人在阿拉斯加北部Beaufort海域对浅海水下工程噪声进行了监测,记录的噪声类型包括不同类型钻孔船只在钻井过程中产生的水下噪声,实验结果显示,钻井噪声能量主要集中于20-1000Hz,其中,使用挖泥船钻井产生的噪声最大,在距离0.46km处,声压级为150dB,而拖曳船只钻井产生的噪声最小,距离0.17km处,声压级为122-125dB<sup>[28]</sup>。Blackwell在2004年的研究表明,固定钻井平台和人工岛屿产生的钻井噪声能量主要集中于700-1400Hz的中低频段,最大声压级可达184 dB re 1μPa @ 1 m,而钻井船只相较于钻井平台和人工岛屿,通常会产生更高的声压级、更低的主频和更宽的带宽,这是因为使用钻井船只钻井时,为了保证其位置的固定,会使用推进器,从而产生更高的噪声<sup>[29]</sup>。

#### (5) 海上风电场运营期噪声

海上风电场在运转过程中可能产生两类噪声：一是风机叶片的转动，在空气中产生气动噪声；二是机组内部的机械运转产生噪声：风机叶片带动齿轮箱和发电机转动过程中，机械传动会产生振动(包括轮毂中活动部件的机械噪声)并通过风轮机相应结构辐射到水中。这两类噪声传播路径如图 1.3 所示，主要分三种：①气动噪声通过水气界面进入水中；②结构振动噪声会直接通过塔架辐射入水；③结构振动通过与海底相连的底座辐射噪声并在海床上传播，部分声能在海床传播过程泄漏进入水中。

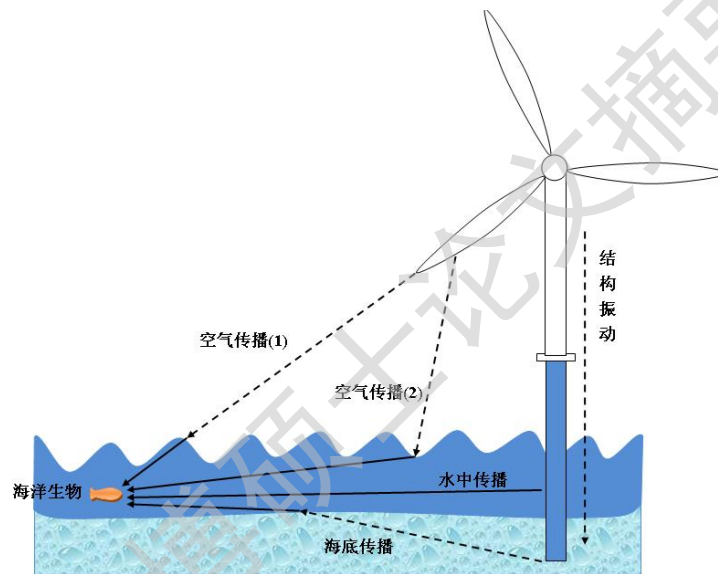


图 1.3 风机运转过程产生的噪声传播路径示意图

Fig.1.3 The propagation path of noise from fan operation process

从 2007 年 Nedwell<sup>[30]</sup>总结的英国 North Hoyle、Scroby sands、Kentish Flats、Barrow 海上风电场风机运营水下噪声测量结果，以及 2008 年 Ansgar Diederichs 等<sup>[31]</sup>对 Utgrunden、Horns Rev、Nysted、Paludans Flak 4 个海上风电场风机水下噪声声源级的推算，风机运营期产生噪声的声源级基本低于 160dB。结合 Degn<sup>[33]</sup>、Klaus<sup>[33-34]</sup>等人多次对风机运营期水下辐射噪声进行的测量分析，可以认为风机运转过程中水下辐射噪声能量集中分布于 800Hz 以下。

### 1.1.2 南美白对虾及其价值

南美白对虾(*Litopenaeus Vannamei*)，又称凡纳滨对虾、白皮虾、白虾，原产于南美太平洋沿岸水域。其外形与中国明对虾近似，成体最长可达 23cm，正常体色为青蓝色或者浅青灰色，全身不具斑纹<sup>[35]</sup>，外观如图 1.4。自然栖息区为泥



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.